Title	回転BECにおける量子渦格子の形成のダイナミクス(「有限量子多体系の励起構造と相関効果」-原子核・量子ドット・ボース凝縮・クラスターを中心として-,研究会報告)
Author(s)	笠松, 健一; 坪田, 誠; 上田, 正仁
Citation	物性研究 (2002), 78(3): 252-254
Issue Date	2002-06-20
URL	http://hdl.handle.net/2433/97239
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	publisher

回転BECにおける量子渦格子の形成のダイナミクス

大阪市大院・理　笠松健一、坪田誠
東京工業大院・理　上田正仁

Bose-Einstein凝縮体(BEC)の超流動性は、その回転に対する挙動に興味深い物理現象をもたらす。近年、いくつかの実験グループがアルカリ原子気体のBECに回転を加える事によって量子渦を生成し、その観測に成功している[1]。フランスのENSグループ[2]は、量子渦形成の動的過程を直接観測し、渦形成のメカニズムとして凝縮体の四重極変形モードの不安定性により引き起こされている可能性を指摘した。我々は量子渦形成のシナリオを凝縮体が従う運動方程式である現象論的散逸項γを導入した2次元Gross-Pitaevskii方程式

$$(i-\gamma)\frac{\partial\psi(\mathbf{r}_\perp,t)}{\partial t}=\left[-\nabla_\perp^2+V_{\rm trap}(\mathbf{r}_\perp)+C|\psi(\mathbf{r}_\perp,t)|^2-\mu-\Omega L_z\right]\psi(\mathbf{r}_\perp,t) \quad (1)$$

$$\mathbf{r}_\perp=(x,y)$$

を数値的に解く事により明らかにした[3]((1)式は調和振動子ポテンシャルの時間と長さスケール: ω^{-1}, $\sqrt{\hbar/2m\omega}$で無次元化している)。ここで$C=8\pi a_s N_{\rm 2D}$はs波散乱長と凝縮体の(二次元平面内の)粒子数に依存するパラメータであり、ENSの実験状況だとその値は約500となる。また散逸項γの値は式(1)とBECの集団励起の振動の実験結果[4]を比較した研究[5]を引用し、0.03を用いる。

回転のない閉じ込めポテンシャル中での凝縮体の平衡状態を初期状態とし、突如、量子渦が生成する臨界振動数以上の回転を与える状況を考える。図1は凝縮体の密度プロファイルの時間変化を示したものである。まず(b)のように凝縮体は四重極に変型し、振動する。その振動は散逸の影響により減衰し、徐々に凝縮体の表面にさざ波が立ちはじめ(c)、それが(d)のように量子渦のコアへと発展する。渦が凝縮体の内部へ侵入すると共に四重極変形が元の形に戻り(e)、(f)のように規則正しい渦格子を形成した。一方、図2は図1と同時刻に対応する位相場のプロファイルを示したものである。図2(b)を見れば分かるように、回転が加わるとすぐに凝縮体の内部ではirrotational velocity field $\mathbf{v}=\alpha\nabla(xy)$のプロファイルになる、ここで$\alpha$は凝縮体の変形をあらわすパラメータである[6]。一方、凝縮体表面(Thomas-Fermi表面)より外側に非常に多くの数の2πの循環を持つ位相の欠陥、すなわち量子渦が存在しているのが分かる。それらは凝縮体の密度がほとんど零の領域に存在する位相場の欠陥であるために、全系のエネルギーや角運動量には何の寄与も及ぼさない量子渦として存在する(我々は“ghost vortex”と名付けた)。やがてghost vortexは密

度がある程度大きな値を持つ凝縮体の表面に到達し、しばらく時間がたった後に凝縮体表面に励起される短波長の表面波を介して凝縮体内部に侵入する。内部に侵入して生き残る量子渦の数は回転振動数に依存して決まり、それ以外は凝縮体の外側にはじかれる。

最初の渦ができる臨界角振動数は、磯島·町田によってなされた回転BECの安定性の解析から得られたlocal instabilityによって決まっている[7]。local instabilityは渦無し状態を安定化させるエネルギーバリアの消失に対応し、不安定化を引き起こすモードは凝縮体表面に局在している。本研究では線形近似の議論をこえた非線形ダイナミクスを追う事により、実際に表面波の不安定性によりリップルがたって量子渦に発展していく様子をとらえた。このリップルの正体について明確な答えはまだ得られていない。一つの可能性として、トラップの回転により最初は主に角運動量量子数 $l = 2$ の表面波が凝縮体に励起されるが、その後、非線形なモード-モード間の結合により、高い角運動量と短い波長をもつ表面波モードに遷移し、これが量子渦のコアに発展していくものと考えられる。

reference

[1] K. W. Madison *et al*, Phys. Rev. Lett **84**, 806 (2000);
J. R. Abo-Shaeer *et al*, Science, **292**, 476 (2001);
P. C. Haljan *et al*, Phys. Rev. Lett. **87**, 210403 (2001);
E. Hodby *et al*, Phys. Rev. Lett. **88**, 010405 (2002).

[2] K. W. Madison *et al*, Phys. Rev. Lett. **84**, 806 (2000).

[3] M. Tsubota, K. Kasamatsu, M. Ueda, Phys. Rev. A (2002) (in press), cond-mat/0104523; J. Low Temp. Phys. (2002) (in press), cond-mat/0107174.

[4] D. S. Jin, *et al*, Phys. Rev. Lett. **77**, 420 (1996);
M. -O. Mewes, *et al*, *ibid.* **77**, 988 (1996).

[5] S. Choi, S. A. Morgan, and K. Burnett, Phys. Rev. A **57**, 4057 (1998).

[6] A. Recati, F. Zambelli, and S. Stringari, Phys. Rev. Lett. **86**, 377 (2001).

[7] T. Isoshima and K. Machida, Phys. Rev. A **60**, 3313 (1999).

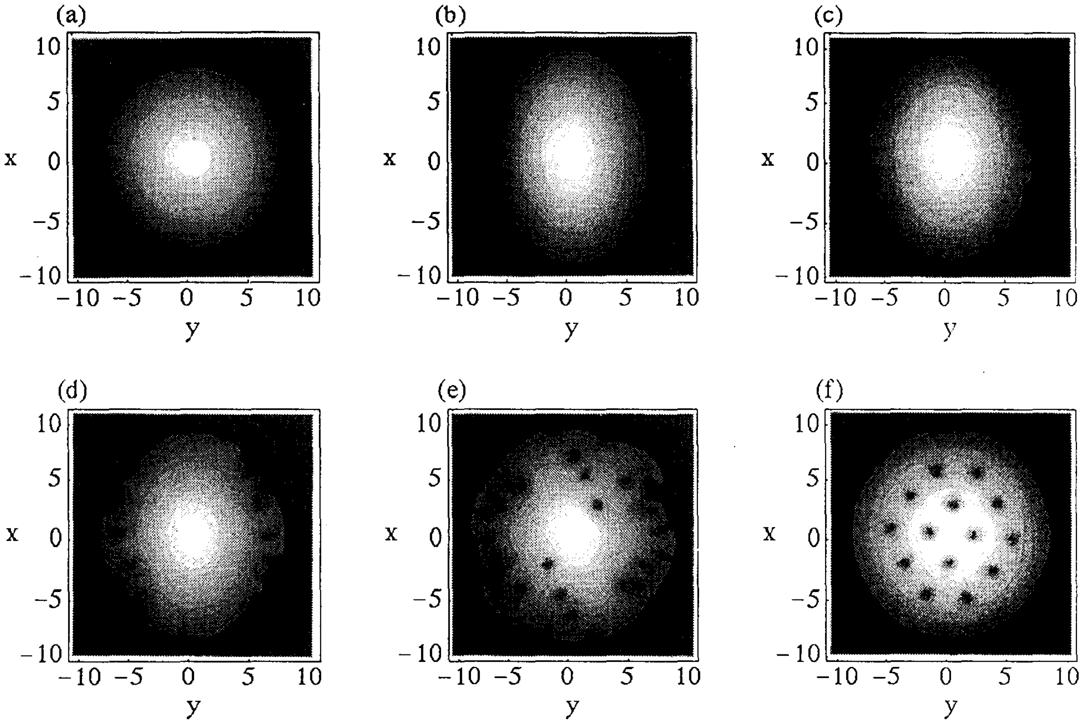

図 1: $C = 1500, \Omega = 0.7\omega_{\perp}$ に対する凝縮体密度 $|\psi|^2$ の時間発展。 $t = 0$ msec(a), 21 msec(b), 107 msec(c), 114 msec(d), 123 msec(e), and 262 msec(f)。

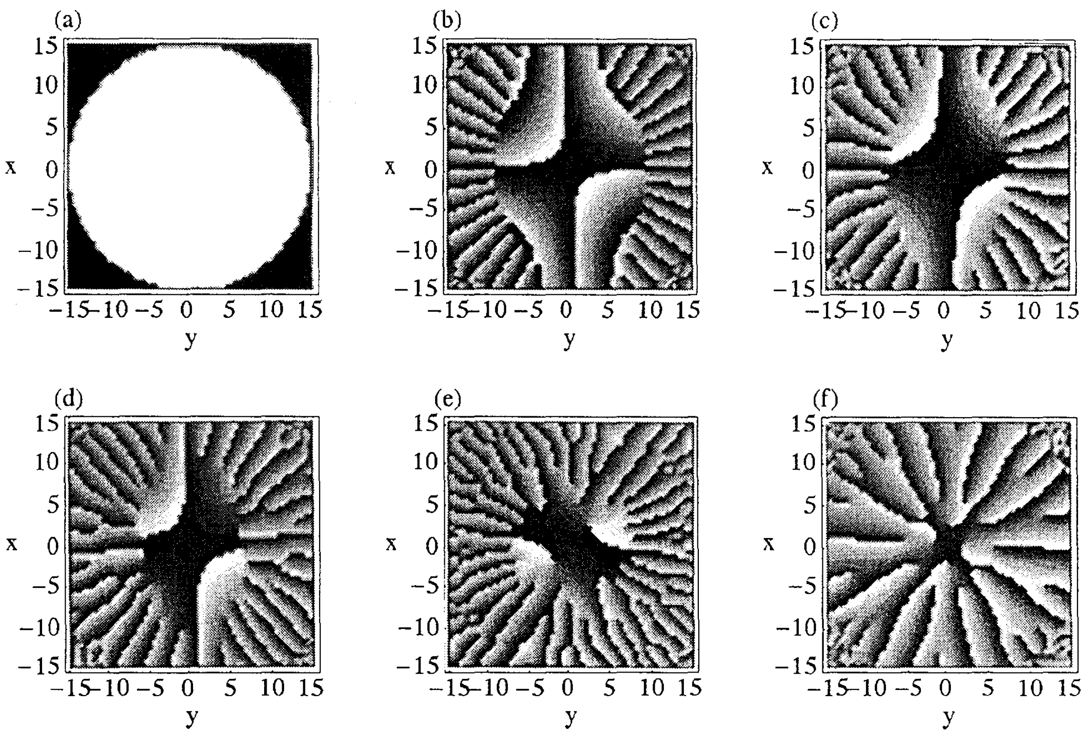

図 2: 図 1 に対応する波動関数 ψ の位相場. 位相の値 $[0, 2\pi]$ は黒（0）から白（2π）に連続的に変化する。すなわち黒と白の間の不連続線が複素平面におけるブランチカットに対応しており、その端が位相欠陥（量子渦）を表す。